

基于COMSOL的细胞尺度植物物料干燥过程数值模拟

范芑佐¹, 王鹏¹, 朱跃强², 刘格含³

1. 机械工程学院深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室, 北京石油化工学院, 北京, 中国

2. 能源与动力工程学院教育部热流体科学与工程重点实验室, 西安交通大学, 西安, 陕西, 中国

3. 环境与生命学部, 北京工业大学, 北京, 中国

简介: 利用COMSOL软件构建了由简化的模型细胞组成的组织结构, 依据此物理模型, 分别建立水分在细胞各部分中的传输方程, 并采用吸湿膨胀分支模拟细胞组织的失水变形过程, 实现了植物物料细胞尺度的干燥过程数值模拟。

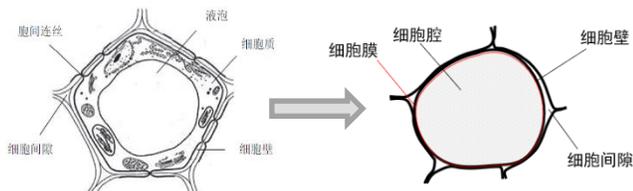


图 1. 简化的细胞结构

计算方法: 基于菲克扩散定律, 分别推出水分在细胞腔、细胞壁、细胞间隙中的传输方程:

$$(\rho_{dm,\eta} + X_{\eta} \frac{\partial \rho_{dm,\eta}}{\partial X_{\eta}}) c_{w,\eta} \frac{\partial \Psi_{\eta}}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\rho_{dm,\eta}}{1 + X_{\eta}} D_{w,\eta} c_{w,\eta} \nabla \Psi_{\eta} \right)$$

$$\rho_{dm,\kappa} c_{w,\kappa} \frac{\partial \Psi_{\kappa}}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_{dm,\kappa} D_{\kappa} c_{w,\kappa} \nabla \Psi_{\kappa})$$

$$\rho_a c_{w,\gamma} \frac{\partial \Psi_{\gamma}}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_a D_{w,\gamma} c_{w,\gamma} \nabla \Psi_{\gamma})$$

边界条件采用狄利克雷边界条件描述:

$$\Psi = \Psi_0$$

干燥过程中的失水变形现象采用固体力学理论描述, 将细胞假设为粘弹性材料, 控制方程如下:

$$\rho \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_q + \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{el}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[(\nabla \delta)^T + \nabla \delta \right]$$

边界条件采用位移边界条件, 固定中心位置使组织向中心收缩。力学方程可采用结构力学模块求解。

结果: 采用文献的实验结果对模型进行验证, 干燥时间为350min, 干燥温度为60°C, 环境相对空气湿度为0.65, 计算后得到的含水率变化结果如下图2所示。

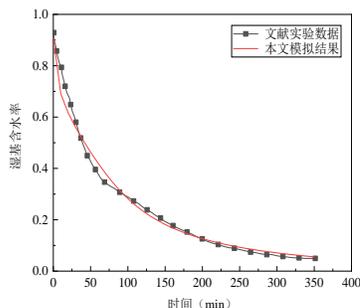


图 2. 含水率变化对比

水分分布与文献实验对比如下图3、图4所示, 左侧为文献实验结果, 右侧为本文模拟结果。可以看出本文模型计算结果与文献结果吻合, 证明所提模型的正确性。

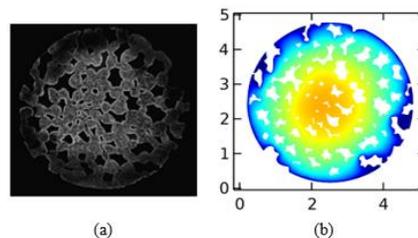


图 3. 60min文献实验结果(a)与模拟结果(b)对比

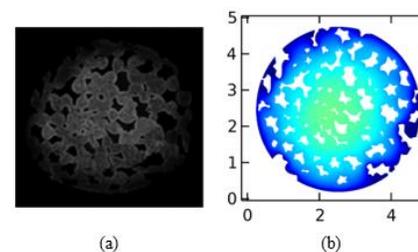


图 4. 100min文献实验结果(a)与模拟结果(b)对比

水势分布如下图5所示, 体积应变分布如下图6所示。计算结果表明, 干燥过程中组织外侧先失水, 随后水分从内部扩散至外部, 由于结构不同, 水分在组织中的扩散速度不同。细胞随着水分的失去发生收缩现象, 水分含量低的位置先变形。

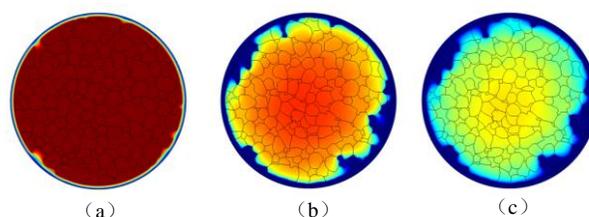


图 5. 0min (a) .180min (b) .350min (c) 水势分布

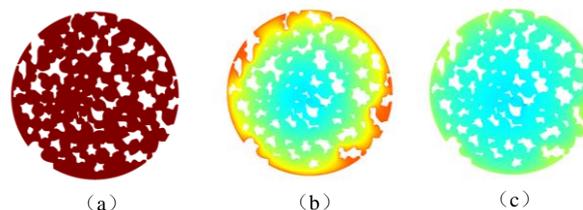


图 6. 0min (a) .180min (b) .350min (c) 体积应变分布

结论: 本研究在考虑干燥过程植物物料细胞结构以及失水收缩现象的基础上, 建立了水分传输模型和力学模型, 实现了水分传输与形变的耦合, 并与文献实验结果对照。结果表明, 模拟结果符合实验规律, 说明了该模型的正确性。

参考文献:

1. Mohammad M. Rahman, Mohammad U.H. Joardder, Azharul Karim, Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material[J]. Biosystems Engineering, 2018, 169.